U P C
ESCOLA UNIVERSITÀRIA POLITÈCNICA DE VILANOVA I LA GELTRÚ

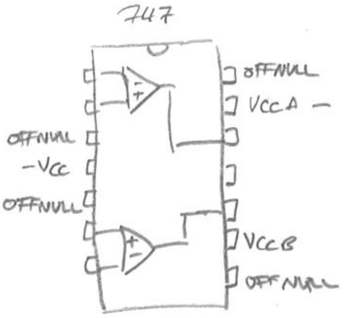
PRÀCTICA 3

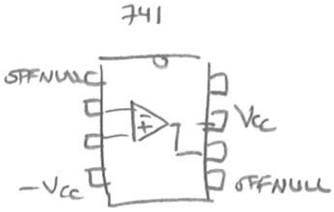
CALIBRACIÓ DE LA CADENA DE MESURA DE TEMPERATURA

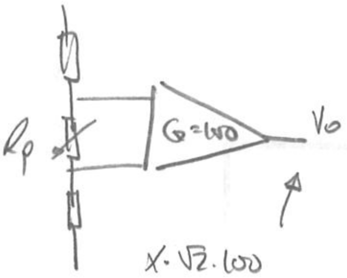
CURS 96/97

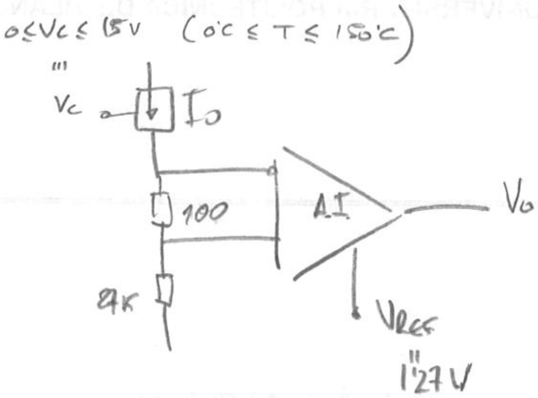
DEPARTAMENT D'ENGINYERIA ELECTRÒNICA

INSTRUMENTACIÓ I MESURES ELECTRÒNIQUES


747
OFFNULL
VCCA —
OFFNULL
—VCC
OFFNULL
VCCB
OFFNULL


741
OFFNULL
VCC
—VCC
OFFNULL


Rp
G=100
Vo
X·√2·100


0≤Vc≤15V (0°C ≤ T ≤ 150°C)
Vc
Io
100
AI
Vo
2K
VREF
1'27V

3 Calibració de la cadena de mesura de temperatura

3.1 La calibració de sistemes de mesura

Tots els instruments s'han de calibrar abans de la seva utilització. Aquest és l'últim pas que es realitza a la fàbrica, abans de començar la comercialització de l'equip. El procés de calibració pretén eliminar els errors sistemàtics de l'equip, o sigui, aconseguir que les lectures obtingudes amb l'instrument siguin bones aproximacions al vertader valor de la magnitud que es vol mesurar. Naturalment, el vertader valor de la magnitud, s'obté a partir d'un instrument patró. El patró de calibració disposa d'una precisió dos o tres ordres de magnitud superior a la precisió de l'instrument que es vol calibrar.

La seqüència de calibració es repeteix per cadascuna de les escales de l'instrument. Està formada per dos passos:

a) ajust del zero
b) ajust de fons d'escala.

La Fig. 3.1representa la sortida de l'instrument en funció de la magnitud a mesurar, una vegada s'ha acabat de muntat el circuit. Respecte de la sortida ideal, governada per l'equació

$$V = S \cdot m + V_0 \tag{3.1}$$

s'observa un error de zero i un error de sensibilitat.

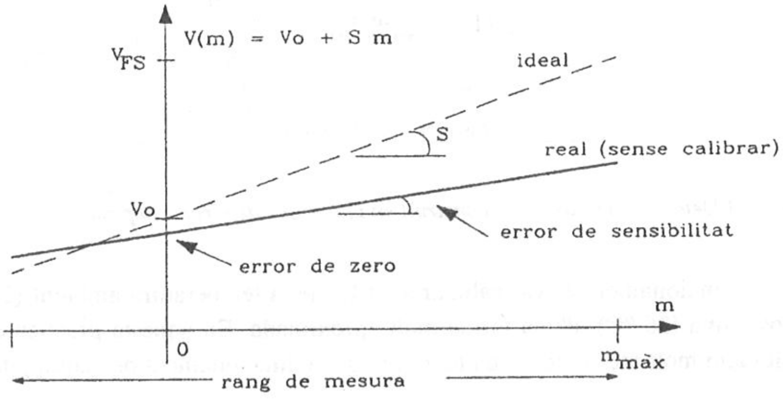


Fig. 3.1 Característica de sortida després de muntar el circuit

L'ajust es realitza mitjançant potenciòmetres, condensadors variables (*trimmers*) o inductàncies ajustables, depenent del tipus de circuit electrònic a calibrar. Molts equips moderns disposen de potenciòmetres digitals controlats pel propi microprocessador de l'instrument, per realitzar el procés de calibració automàticament a partir d'un seqüència programada. La Fig. 3.2 mostra la seqüència que s'ha de seguir per aconseguir calibrar l'instrument.

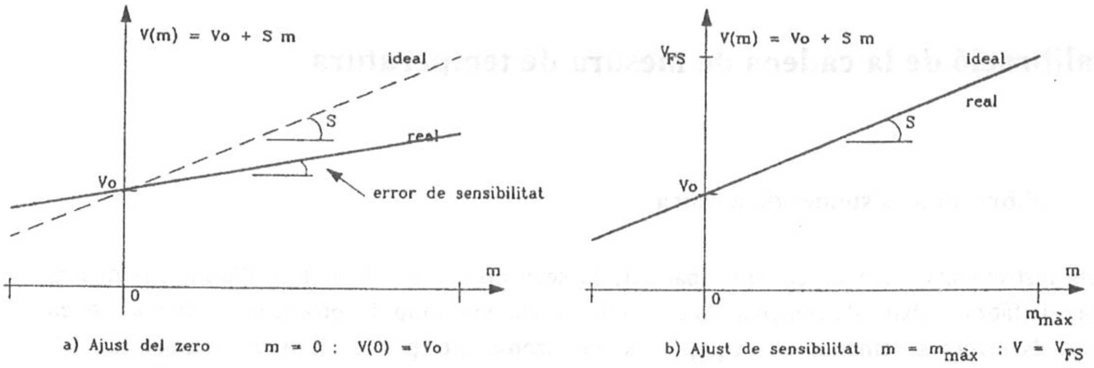


Fig. 3.2 Seqüència de calibració. a) ajust del zero, b) ajust de fons d'escala

En el nostre cas, l'equip a calibrar és la cadena de mesura de temperatura dissenyada a la Pràctica 2. La Fig. 3.3 mostra com quedaria la disposició de components sobre una placa de circuit imprès, en el cas d'haver-la de muntar per a la seva comercialització. El sensor va connectat amb un cable de dos fils trenats amb un blindatge protector, a la regleta o *jack* que hi ha al costat de la placa. Així, es pot muntar en sèrie tot el circuit electrònic. Al final de la producció es realitza la calibració, procedint a l'ajust dels potenciòmetres R_g i R_p del condicionador de senyal, i RJ_1 i RJ_2 del visualitzador LCD.

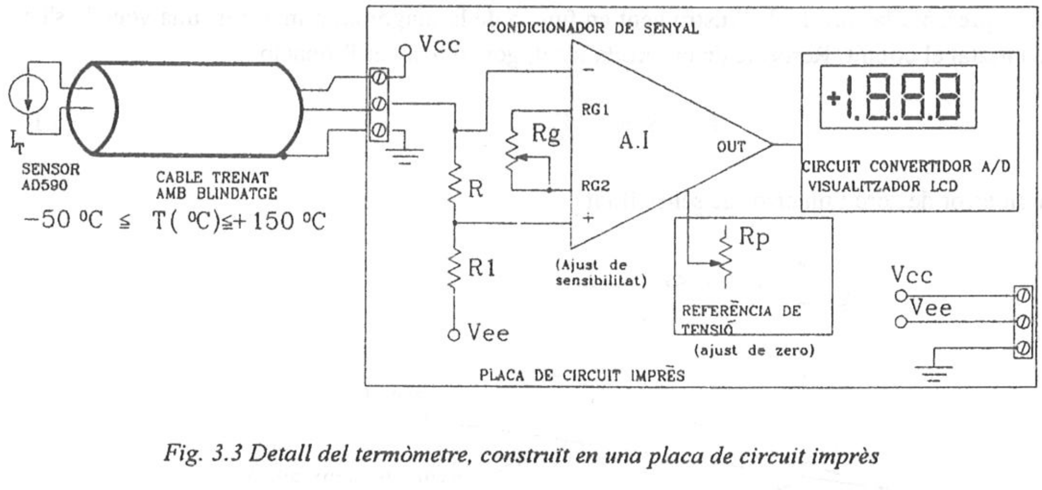


Fig. 3.3 Detall del termòmetre, construït en una placa de circuit imprès

La comprovació del seu funcionament es va realitzar a partir de la temperatura ambient (20 °C) i de la temperatura del cos humà (36 °C), d'una forma molt aproximada. En aquesta pràctica es tractarà d'aconseguir una calibració molt més precisa, en tot el marge de funcionament de l'equip, de -50 °C a +150 °C.

Per aconseguir un marge de temperatures tant extens, fins a $\Delta T = T_{màx} - T_{min} = 200$ °C, es dissenyarà un circuit simulador del sensor de temperatura AD590, tal com es mostra a la Fig. 3.4 .

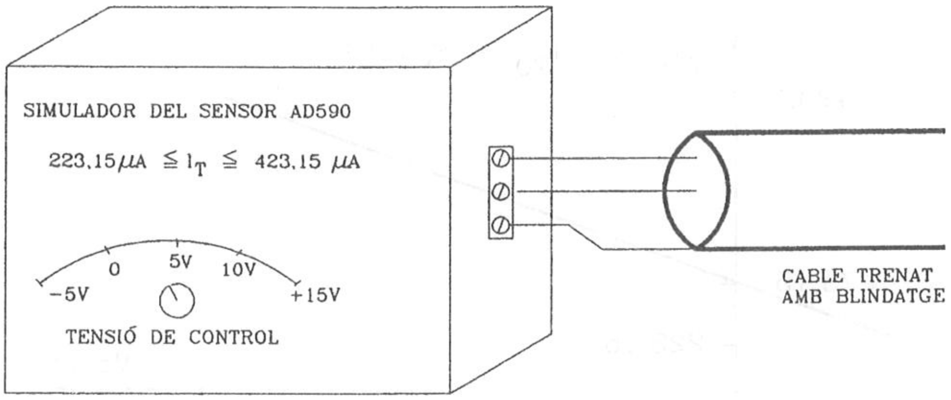


Fig. 3.4 El simulador s'utilitza en lloc del sensor per calibrar la cadena de mesura

El simulador electrònic permet calibrar una gran quantitat d'equips fabricats en pot temps. Amb aquest equip, ràpidament pot simular-se el corrent que donaria el sensor si estes situat a una temperatura de 0 °C i el corrent que donaria a la temperatura de fons d'escala de 150 °C. Hom pot imaginar-se, els inconvenients i la lentitud que representaria si cadascun dels termòmetres fabricats hagués de passar per un forn de fred-calor per realitzar la calibració de zero i de fons d'escala.

3.2 Disseny del simulador del sensor de temperatura

En aquesta aplicació, el circuit simulador és ben senzill. Es tracta d'un convertidor voltatge-corrent de precisió. A la Fig. 3.5 hi ha representat el circuit V/I. A partir de la variació de la tensió de control v_c simularem una variació de temperatura. Així es produirà la mateixa variació del corrent de sortida que s'obté del sensor AD590. A la Fig. 3.6 s'hi mostra la corba de calibració d'aquest circuit de precisió. Fixem/-nos-hi que una sensibilitat amb la temperatura de 1µA/°K només s'obtindrà si es dissenyen acuradament les resistències, i s'escullen AO de precisió.

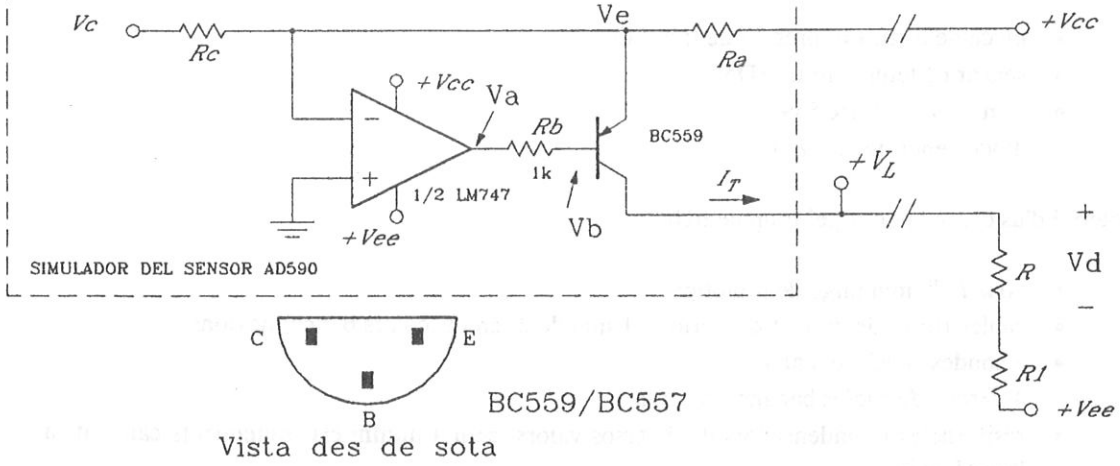


Fig. 3.5 Convertidor V/I simulador del sensor AD590

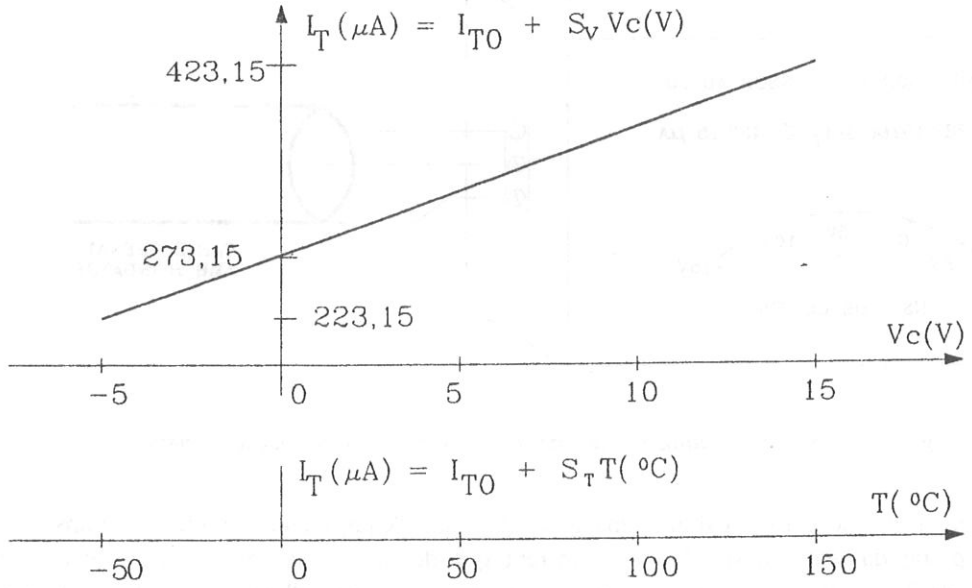


Fig. 3.6 Corba de calibració del convertidor V/I

3.3 Material de pràctiques

Per realitzar aquesta pràctica és necessari disposar del següent material:

- Components entregats al grup de treball:

- 1 AO dual LM747

- Components facilitats pel professor, a retornar a l'acabar la sessió de pràctiques:

- placa de circuit imprès AI de tres AO
- sensor de temperatura AD590
- transistor PNP BC559
- diode zener de 6,8 V, 1 W

- Material d'us comú aportat pel grup de treball:

- *board* de muntatge de prototips
- cables rígids de diàmetre inferior a 1 mm de diferents colors per connexions
- 3 sondes BNC - banana
- 4 parells de cables banana - banana
- resistències i condensadors de diversos valors, com a mínim els components calculats a l'estudi previ
- resistències ajustables de diversos valors

3.4 Estudi previ

Abans de la classe de laboratori s'han de resoldre els apartats corresponents a l'estudi previ. Després de la sessió pràctica, s'ha de lliurar al professor la fulla de resultats emplenada amb les mesures realitzades.

Un objectiu de la pràctica és l'anàlisi de les causes d'error degut a la no idealitat dels components electrònics emprats. Aquests errors s'han de conèixer per saber escollir els components ue cal utilitzar, en funció de la precisió especificada per l'instrument. Lògicament, amb components barats, resistències de carbó del 5%, AO convencionals, alimentacions no estabilitzades, etc., aconseguirem menys precisió.
Un altre objectiu de la pràctica, és la lectura en detall i la obtenció de dades dels sensors i components electrònics a partir de la informació subministrada pel fabricant en els *databooks*. La publicació "Especificacions de fabricant sensors i amplificadors de senyal de mesura" conté gran part d'aquesta informació necessària fotocopiada dels manuals.

P1) La Fig. 3.7 mostra la font de corrent de *Howland* construïda amb un AO i quatre resistències que han de ser aparellades dues a dues: $R_3 = k R_1$; $R_4 = k R_2$. Sent aquest el principal problema del circuit, de cara a l'obtenció d'una bona precisió. El corrent de sortida es controla a través de les tensions V_1 i V_2 .

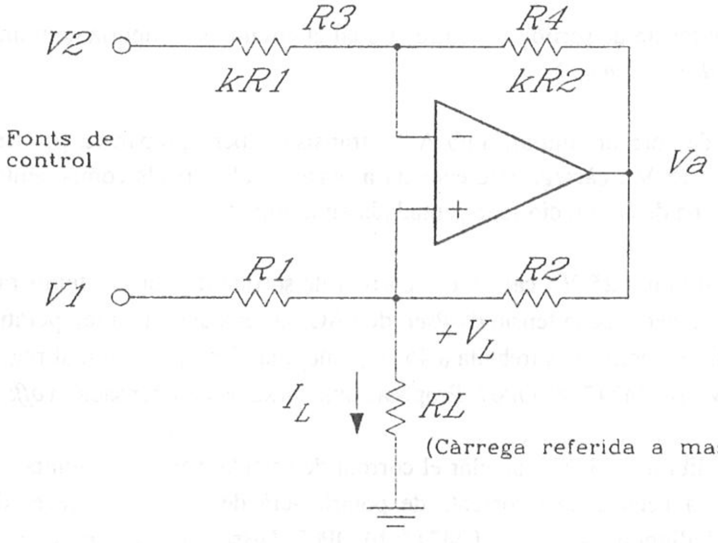


Fig. 3.7 Font de corrent de Howland

a) Calcular I_T =f(V_1 ,V_2)

b) Calcular el marge de valors de tensió de sortida V_L entre els quals el circuit es comporta com una font ideal de corrent (es tracta de la característica típica *voltage compliance range* en anglès). Preneu R_1 = 10 kΩ; R_2 = 2,5 kΩ ; V_2 = 0 ; sent la variació màxima de sortida del AO de ± 10 V (*OpAmp maximun voltage swing*).

c) Calcular els marges de variació del corrent de sortida, si $V_{1\ \text{màx}}$ = ± 10 V.

P2) Calcular el valor del corrent de sortida I_T del convertidor V/I mostrat a la Fig. 3.5 en funció de tots els paràmetres del circuit, si podem modelar l'AO i el transistor tal com es mostra a la Fig. 3.8 .

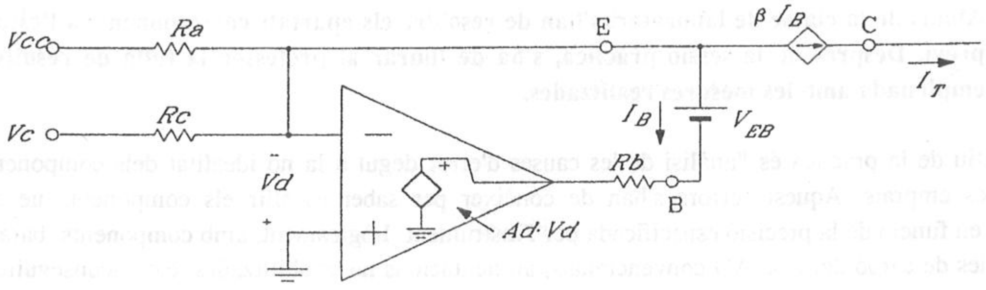


Fig. 3.8 Estudi del convertidor V/I amb models lineals del transistor i AO

P3) Simplificar l'expressió anterior suposant $Ad \rightarrow \infty$; $\beta >> 1$. Calcular el valor de les resistències *Ra* i *Rc* , per ajustar la corba representadada en la Fig. 3.6 . Disposar *Ra* com l'addició d'una resistència d'un valor tabulat proper al valor exacte *R'a* , i un potenciòmetre d'ajust de petit valor*Raj*.

P4) Si $V_C = 0$ V, calcular l'error entre el corrent ideal i el real, obtinguts en els anteriors apartats. Preneu $Ad_{\min} = 100$ dB; $\beta_{\min} = 150$; $V_{BE} = 0{,}65$ V.

P5) Calcular el marge de tensió de sortida V_L entre el qual el circuit es comporta com una font ideal de corrent (*voltage compliance range*).

P6) Dissenyar una font de corrent similar, amb AO i transistor, però preparada per treballar amb alimentació única $Vcc = 15$ V i càrrega referenciada a massa. Calcular els components del circuit per obtenir la mateixa corba de calibració representadada en la Fig. 3.6 .

P7) Si el circuit va ser calibrat a 25 °C, calcular el corrent de sortida d'error i la temperatura d'error equivalent en °C, degut a l'efecte de la tensió d'*offset* de l'AO, la seva deriva en temperatura i la seva deriva amb la tensió d'alimentació, si es treballa a 45 °C; amb una font que està mal regulada i varia entre $13 \text{ V} \leq Vcc \leq 15$ V. a) LM747; b) OP07. Proposar una xarxa de compensació d'*offset* .

P8) Si el circuit va ser calibrat a 25 °C, calcular el corrent de sortida d'error i la temperatura d'error equivalent en °C, degut a l'efecte dels corrents de polarització de l'AO i les seves derives amb temperatura, si estem treballant a a 45 °C. a) LM747; b) OP07. Dissenyar una xarxa de compensació per minimitzar els efectes dels corrents de polarització. Recalcular els errors en el cas d'aplicar la xarxa de compensació.

P9) Les toleràncies de les resistències passives,

$$Ra = Ra_0\,(1 \pm \alpha_a) \quad ; \quad Rc = Rc_0\,(1 \pm \alpha_c) \qquad (3.2)$$

també són una font d'error sistemàtic important que limita la precisió del circuit. La Fig. 3.9 mostra com es produeix un error sobre el zero i sobre la sensibilitat de la corba de calibració. Si considerem l'error en corrent com la diferència entre la sortida ideal i la real,

$$I_{T\,\mathrm{ERROR}} = I_{T\,\mathrm{IDEAL}} - I_{T\,\mathrm{REAL}} \qquad (3.3)$$

calcular en cada cas l'error de zero i l'error de sensibilitat. a) Resistències de compost de carbó amb tolerància del 5 %. b) Resistències de precisió metàl·liques bobinades del tipus "wire-wound" amb tolerància 0.5 %.

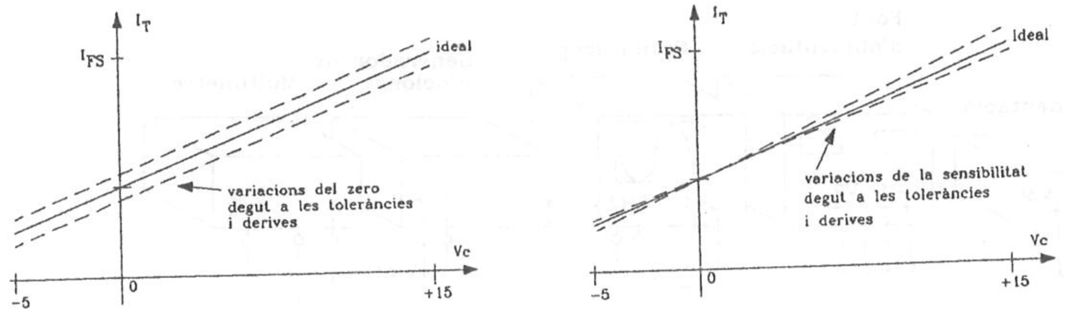


Fig. 3.9 Efecte de la tolerància de les resistències sobre el zero i la sensibilitat

P10) Les derives de les resistències passives, degut al seu coeficient de temperatura δ (*temperature coefficient of resistance, TCO*)

$$Ra = Ra_0 (1 + \delta_a \Delta T) \quad ; \quad Rc = Rc_0 (1 + \delta_c \Delta T) \tag{3.4}$$

també són una font d'error aleatori o accidental que provoca errors en la precisió del circuit. Si el circuit va ser calibrat a 25 °C, i ara es treballa a 45 °C, calcular en cada cas l'error de zero i l'error de sensibilitat. a) Resistències de compost de carbó amb δ = 500 ppm/°C (resistències normals d'una pesseta). b) Resistències de precisió metàl·liques bobinades del tipus "wire-wound" amb δ = 10 ppm/°C (200 pessetes la unitat).

3.5 Treball de laboratori

A més de realitzar el muntatge del simulador de sensor AD590, per poder calibrar el termòmetre en tot el marge de treball, s'utilitzarà el multímetre del lloc de treball per mesurar voltatges i corrents DC de baix nivell.

L1) Verificació de funcionament de la placa AI.

- Repetir l'apartat L1 de la Pràctica 2 amb el mateix circuit (Fig. 2.14).
- Repassar les alimentacions dels xips.
- Verificar la existència de masses virtuals a les entrades dels AO.
- Ajustar el guany de l'AI mitjançant la resistència *Rg*.

Obtenir l'alimentació simètrica a partir de les fonts d'alimentació de color verd situades al mig del lloc de treball. Compartir aquestes tensions entre dos llocs de treball.

NOTA IMPORTANT: Encara que sigui una pràctica de mesures en DC, és necessari mantenir connectats tots els instruments, per poder realitzar en qualsevol moment, una verificació de funcionament del circuit (per si s'ha desconnectat un cable accidentalment, o hi ha un mal contacte d'un potenciòmetre, etc.).

L2) Connectar el sensor AD590 tal com mostra la Fig. 2.10*b*, i ajustar la tensió de referència. Verificar que treballa correctament a la temperatura ambient i a la temperatura del cos humà (exercici L4 de la Pràctica 2).

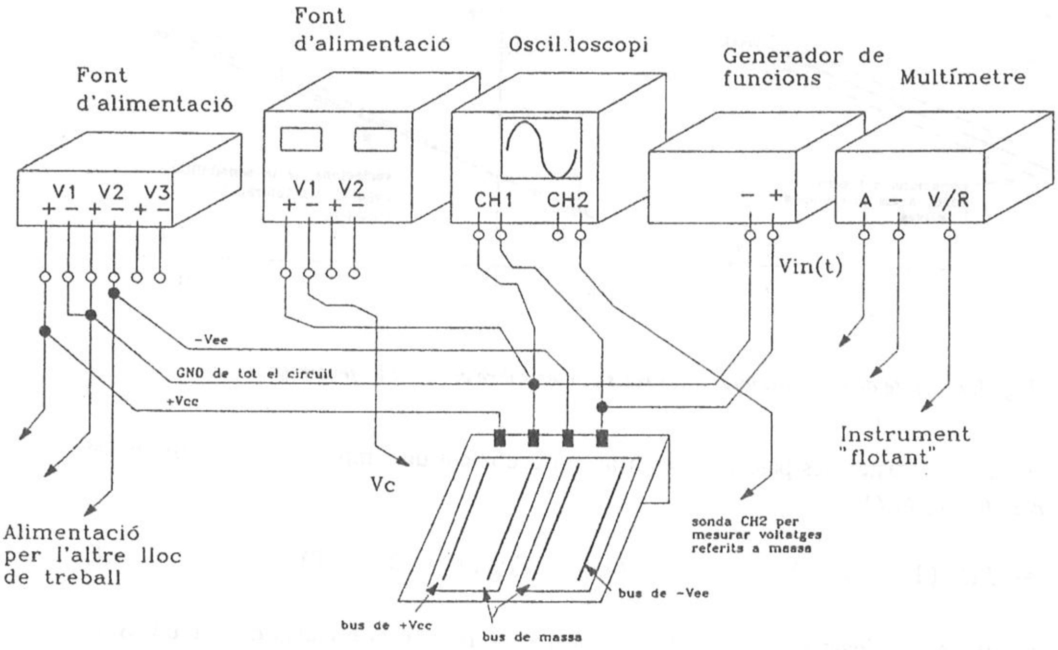


Fig. 3.10 Disposició del "board" i de la instrumentació del lloc de treball

L3) Utilitzant l'altre AO que queda lliure del LM747, muntar la font de corrent de la Fig. 3.5 calculada a l'exercici P3. Utilitzar la font d'alimentació variable per generar la tensió de control V_C.

- Mesurar V_E , la tensió a l'emissor del transistor
- Mesurar V_B , la tensió a la base del transistor
- Mesurar V_A , la tensió a la sortida de l'AO

L4) Generar un corrent I_{T0} = 273,15 μA (T = 0 °C). Ajustar la resistència *Raj*. Utilitzar l'amperímetre per mesurar el corrent de sortida de la font. Ajustar la resistència *Rp* del circuit de referència per obtenir la sortida correcta.. Utilitzar el voltímetre per mesurar V_R i V_0.

L5) Generar un corrent I_T = 423,15 μA (T = 150 °C). Utilitzar l'amperímetre per mesurar aquest corrent. Ajustar la resistència *Rg* de l'AI per calibrar la sensibilitat i obtenir la lectura de fons d'escala. Utilitzar l'ajust fi de la font d'alimentació i el voltímetre per establirV_C. Utilitzar el voltímetre per mesurar V_0.

L6) Representar la corba de calibració a partir de la simulació de diverses temperatures en tot el marge de funcionament. Calcular l'error de no-linealitat màxim ($\Delta V_{0\ màx} = V_{0\ màx} - V_{0\ min}$ és l'*span* de sortida).

$$NL = \left. \frac{V_{0\ \text{ideal}} - V_{0\ \text{real}}}{\Delta V_{0\ \text{màx}}} \right|_{\text{màx}} \times 100 \qquad (3.5)$$

OSCAR GIL MOLINA
ALEX RIOS BLANCO

FULL DE RESULTATS DE L'ESTUDI PREVI DE LA PRÀCTICA 4

Nº DE GRUP DE LABORATORI: ______ **SETMANA:** ______

Nº DE LLOC DE TREBALL: ______ **DATA:** ______

NOMS:

____

____

____

P1) Valors dels components

R1 = 10 KΩ R3 = 17'35 KΩ

R2 = 23'6 KΩ R4 = 23'6 KΩ

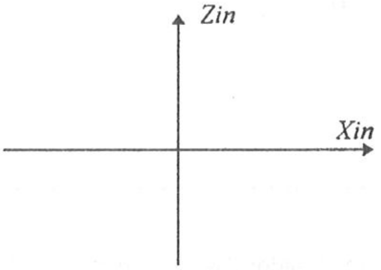
R_D = 14 KΩ

P2) Sortida real del divisor analògic

$$Vo = \frac{V_N \cdot 10}{V_D}\left(\frac{-1}{1+Ke}\cdot\frac{V_D}{V_D + X_{os}}\right) + \frac{2V_{io} - V_{os} - n(x,y)}{1+Ke} - Y_{os}$$

P3) Divisor amb l'ICL8013

$$Vo = \frac{Z_i \cdot 10}{X_i} \qquad -10V < X_i < 0$$



Procediment d'ajust del divisor:

____

____

____

____

____

P4) Sortida real del mòdul d'arrel quadrada

Vo = ______________________

P5) Mòdul arrel quadrada amb l'ICL8013

Vo = ____________________

Utilitat del diode D1:

____

____

____

____

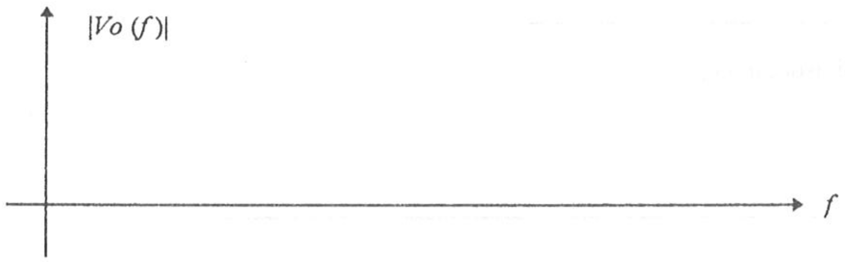
Marge de variació de l'entrada:

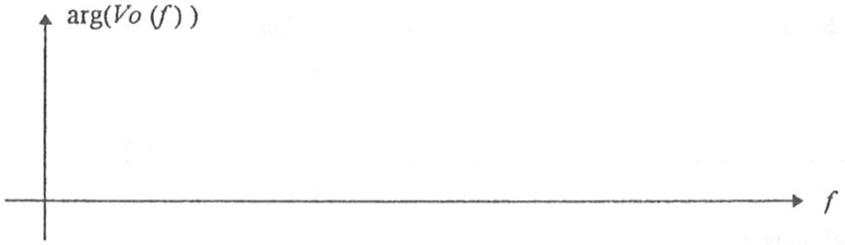
__________ ≥ *Zin* ≥ __________

P6) Modulador en doble banda lateral

Vo = ____________________

Representació de l'espectre del senyal de sortida:





P7) Esquema d'un modulador AM comercial:

L2

G. ΔI = 150   Ve = 1'268 V

	20°	36°	20°	36°
Vb(T)	4'2 V	4'36 V	4'18 V	4'26 V

L3

Ve = 15V   Vb = 1'2 V   Va = 11 V

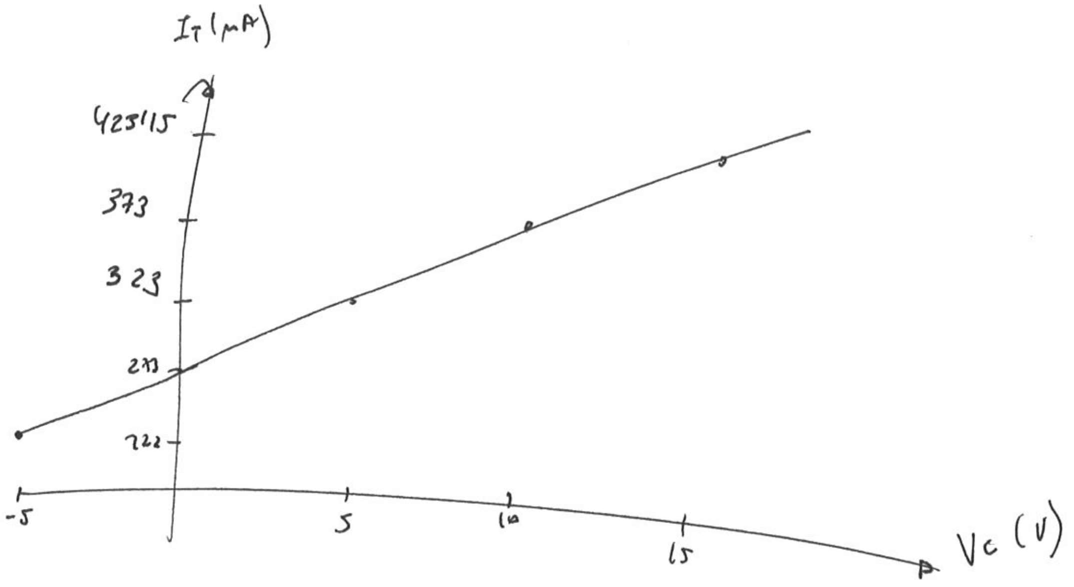
L4

I_{T_0} = 273'15 μA V_R = 1'2V   Vb = 2V

L5

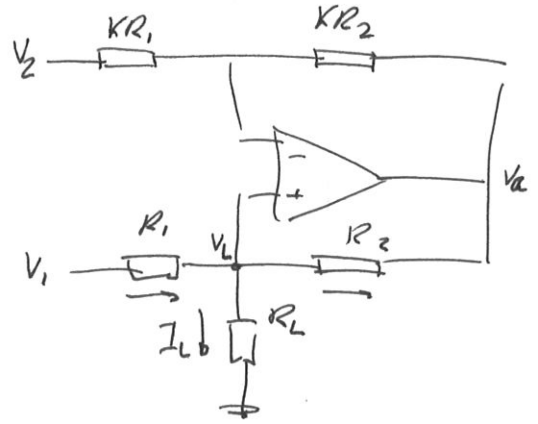
Vc = 15 V I_{TFS} = 423 μA V_0 = 3'2V

L6



P3

P1/



$$V^- = V^+ = V_L \rightarrow V_L = I_L \cdot R_L$$

a/

$$\frac{V_2 - V_L}{KR_1} = \frac{V_L - V_a}{KR_2}$$

$$\frac{V_a}{KR_2} = V_L\left(\frac{1}{KR_1} + \frac{1}{KR_2}\right) - \frac{V_2}{KR_1}$$

$$V_a = V_L\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - V_2\frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{V_1 - V_L}{R_1} - I_L = \frac{V_L - V_a}{R_2}$$

$$I_L = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_a}{R_2} - V_L\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

$$I_L = \frac{V_1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\left[V_L\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - V_2\frac{R_2}{R_1}\right] - V_L\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_L}\right)$$

$$I_L = \frac{V_1}{R_1} + \frac{I_L R_L}{R_2}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{V_2}{R_1} - I_L R_L\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

$$I_L\left(1 - \frac{R_L}{R_2} - \frac{R_L}{R_1} + \frac{R_L}{R_1} + \frac{R_L}{R_2}\right) = \frac{V_1}{R_1} - \frac{V_2}{R_1} \longrightarrow I_L = (V_1 - V_2)\frac{1}{R_1}$$

b/

$R_1 = 10K$

$R_2 = 2K5$

$V_2 = 0$

$A_0 \{ \pm 10V$

$$V_a = V_L\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$V_L = V_a\frac{R_1}{R_1 + R_2} \begin{cases} V_a = 10 \rightarrow V_L = 8V \\ V_a = -10 \rightarrow V_L = -8V \end{cases}$$

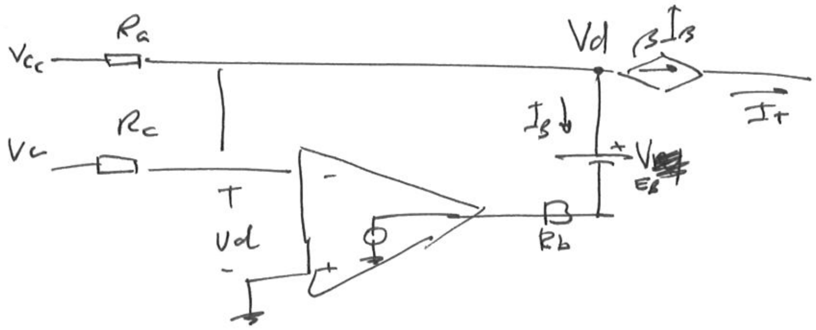
c/

$$I_L < \begin{matrix} V_1 = 10V \longrightarrow \frac{10}{10K} = 1mA \\ V_1 = -10V \longrightarrow \frac{-10}{10K} = -1mA \end{matrix}$$

$$I_L = \frac{V_1}{R_1}$$

a

P2/



$$\frac{V_d - V_0 - V_{EB}}{R_b} = I_B \qquad I_T = \beta I_B$$

$$V_0 = A_d \cdot V_d$$

$$\frac{V_d(1-A_d) - V_{EB}}{R_b} = I_B$$

$$V_d = \frac{V_{EB} + I_B \cdot R_B}{1-A_d}$$

$$\frac{V_{cc} - V_d}{R_a} + \frac{V_c - V_d}{R_c} = I_B + \beta I_B$$

$$\frac{V_{cc}}{R_a} + \frac{V_c}{R_c} - \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_c}\right) \cdot \left(\frac{V_{EB} + I_B \cdot R_b}{1-A_d}\right) = I_B + \beta \cdot I_B$$

$$\frac{V_{cc}}{R_a} + \frac{V_c}{R_c} - \frac{R_a + R_c}{R_a R_c} \cdot \frac{V_{EB}}{1-A_d} = I_B \left(\beta + 1 + \frac{R_a + R_c}{R_a R_c} \cdot \frac{R_b}{1-A_d}\right)$$

$$\frac{V_{cc}}{R_a} + \frac{V_c}{R_c} - \frac{R_a - R_c}{R_a R_c} \cdot \frac{V_{EB}}{1-A_d} = I_B \left(\frac{(\beta+1)(R_a R_c)(1-A_d) + (R_c + R_a) R_b}{(R_a R_c)(1-A_d)}\right)$$

$$I_B = \frac{1}{(\beta+1) R_a R_c (1-A_d) + R_b (R_a + R_c)} \cdot \left(V_{cc} R_c (1-A_d) + V_c R_a (1-A_d) - V_{EB}(R_a + R_c)\right)$$

$$I_T = \beta \cdot I_B$$

P3

$A_d \to \infty$

$\beta \gg 1$

$I_T = \frac{V_{cc}}{R_a} + \frac{V_c}{R_c}$ $\qquad I_T = I_{T0} + S_v \cdot V_c$ $\qquad S_v = \frac{1}{R_c}$

$V_c = 0 \longrightarrow I_T = I_{T0} = 273'15\,\mu A$

$V_c = -5V \longrightarrow I_T = 223'15\,\mu A$

$V_c = 15V \longrightarrow I_T = 423'15\,\mu A$

$223'15 \cdot 10^{-6} = 273'15 \cdot 10^{-6} + \frac{-5}{R_c} \longrightarrow R_c = \frac{5}{50 \cdot 10^{-6}} = 100\,k\Omega$

$423'15 \cdot 10^{-6} = 273'15 \cdot 10^{-6} + \frac{15}{R_c}$

$273'15 \cdot 10^{-6} = \frac{15v}{R_a} \qquad R_a = \frac{15}{273'15 \cdot 10^{-6}} = \underline{54914\,\Omega}$

P4

$V_c = 0$

$A_{d\,min} = 100\,dB \longrightarrow 100K$ $\qquad I_T = 273'15\,\mu A$ (ideal)

$\beta_{min} = 25$

$V_{BE} = 0'65v$

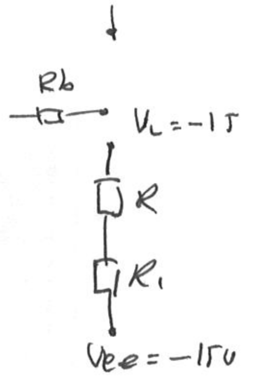
$$I_T = \beta \cdot I_B = \frac{\beta}{(\beta+1)\, R_a R_c\,(1-A_d) + R_b\,(R_a+R_c)} \cdot \Big(V_{cc} R_c (1-A_d) + V_c R_a (1-A_d) - V_{EB}(R_a+R_c)\Big) =$$

$$= \frac{25}{26 \cdot 55k \cdot 100k\,(1-100k) + 1k\,(55k+100k)} \Big(15 \cdot 100k\,(1-100k) + 0 - 0'65\,(55k+100k)\Big) =$$

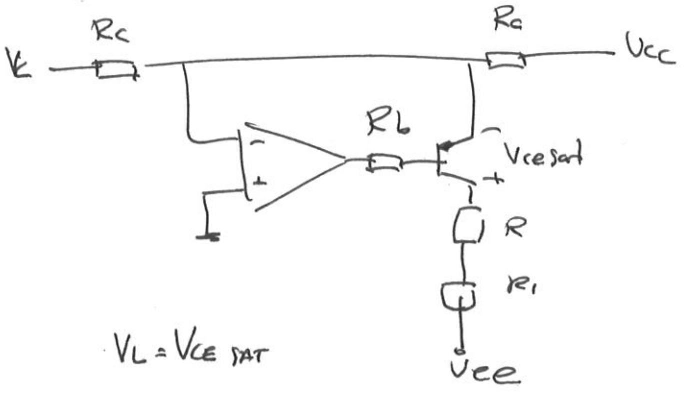
$= 262'23\,\mu A$ (real) $\qquad I_{error} = I_{ideal} - I_{real} = 10'92\,\mu A$

P5/ perquè funcioni correctament la font del TRT ha d'estar en activa

TRT en tall



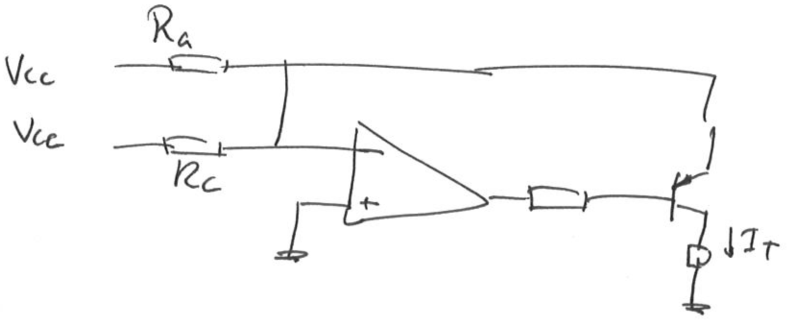
TRT en SAT



$V_L = V_{CE\,SAT}$

Marge de Tensió: $-15v < V_L < V_{ce\,SAT} \simeq 0'2v$

P6/



$$\frac{V_{cc}}{R_c} + \frac{V_{cc}}{R_a} = I_T$$

$$\frac{V_{cc}R_a + V_{cc}R_c}{R_cR_a} = I_T \qquad R_c = \frac{R_a V_{cc}}{I_T \cdot R_a - V_{cc}} = \frac{55k \cdot 15}{423'15 \cdot 10^{-6} \cdot 55k - 15} = \underline{100K}$$

$$\frac{15}{R_a} = 273'15\,\mu A \rightarrow R_a = 55K$$

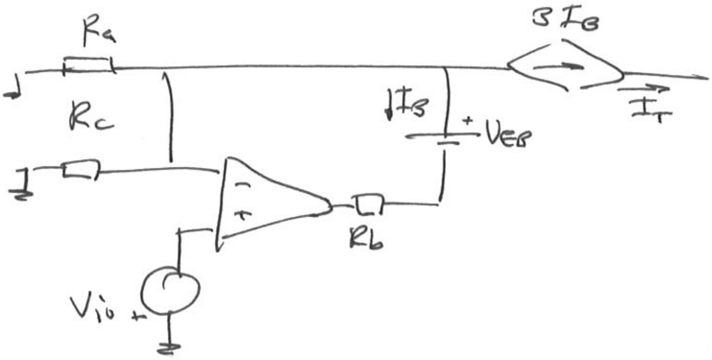
P7/

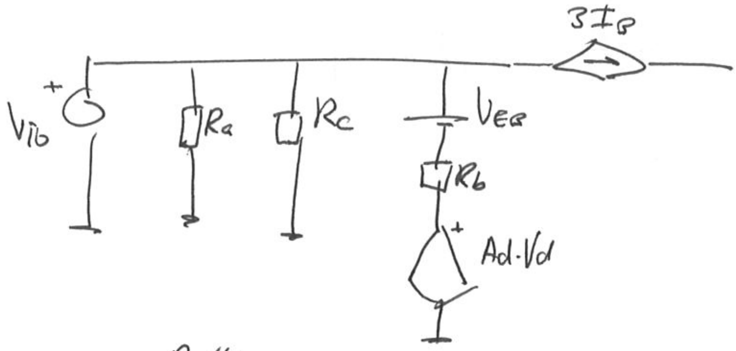
a) LM 747

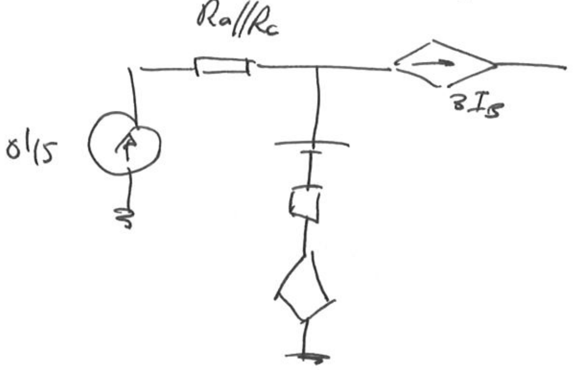
$V_{io\,TOTAL} = 5m + 15\mu \cdot 20 + 15'84\mu \cdot 2 = 5'33\ mV$

$V_{os} = 5mV$

$\frac{\Delta V_{os}}{\Delta T} = 15\,\mu V/°C \qquad \frac{\Delta V_{io}}{\Delta T} = 15'84\,\mu V/°C \qquad PSRR = 96\ dB$







$0'15_\mu = I_B + \beta I_B$

$0'15_\mu = I_B(\beta+1)$

$I_B = \frac{0'15_\mu}{26} = 5'76\ nA$

$I_T = \beta I_B = 25 \cdot 5'76\ nA = 0'144_{\mu A}$

$T_{error} = 0'144_{\mu A}\ \frac{°C}{1_\mu A} = 0'144°C$

b/

OP07

$V_{io\,TOTAL} = 200_\mu V + 1'3_\mu V \cdot 20 + 20_\mu \cdot 2 = 266_\mu V$

$V_{OS} = 200_\mu V$

$\frac{\Delta V_{OS}}{\Delta T} = 1'3_\mu V/°C$

$PSRR = 20_\mu V/V$

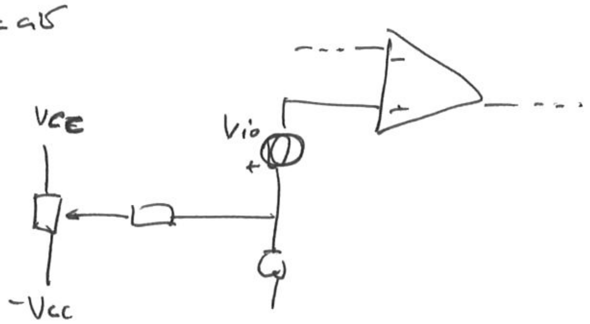
$7'5n = I_B(\beta+1)$

$I_B = 0'288\ nA$

$I_t = 7'21\ nA$

$T_{error} = 7'21\ nA\ \frac{°C}{1_\mu A} = 0'007\ °C$

Compensación

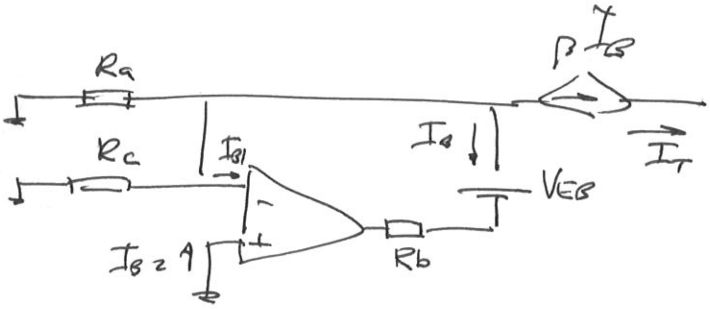


P8/

a) LM 747

$I_{BIO} = 500\,nA$ $I_{B\,TOTAL} = 500\,n + 0'5n \cdot 20 = 0'51\,\mu A$

$\frac{I_B}{\Delta T} = 0'5\,nA/°C$



$I_{B\,TOTAL} = \beta I_B + I_B$

$0'51\,\mu = I_B \cdot 26$

$I_B = 19'6\,nA$

$I_T = \beta \cdot I_B = 0'49\,\mu A$

$T_{error} = 0'49°C$

b/ OP07

$I_{BIO} = 3\,nA$

$\frac{I_o}{\Delta T} = 50\,pA°C$

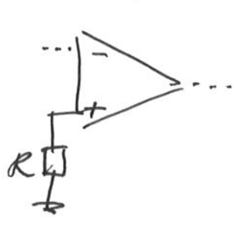
$I_{B\,TOTAL} = 3n + 50p \cdot 20 = 4\,pA$

$I_B = 153'3\,pA$

$I_T = 3'84\,pA$

$T_{error} = 3'84\,m°C$

Red de compensación



pq $R_a = R_{a0}(1 \pm \alpha_a)$

$R_c = R_{c0}(1 \pm \alpha_c)$

a) $I_T = \dfrac{R_c V_{cc} + R_a V_c}{R_a R_c} = \dfrac{R_c V_{cc}}{R_a R_c} + \dfrac{R_a V_c}{R_a R_c}$

$$I_T = \frac{V_{cc}}{R_a} + \frac{V_c}{R_c} = \frac{15}{R_a} + \frac{V_c}{R_c}$$

$$I_{T\,error} = I_{T\,ideal} - I_{T\,real}$$

* amb una tolerancia 5% (carbó)

$R_{a0} = 5496'86\,\Omega$ $\qquad R_a = 5496'8\,(1 \pm 0'05)$

$R_{c0} = 100k$ $\qquad R_c = 100k\,(1 \pm 0'05)$

$$I_{T\,error\,cero} = \frac{15}{R_{a0}} + \frac{V_c}{R_{c0}} - \left(\frac{15}{R_{a0}(1+\alpha_0)} + \frac{V_c}{R_{c0}}\right)$$

$$I_{T\,error\,cero} = \frac{15}{R_{a0}} - \frac{15}{R_{a0}(1 \pm 0'05)} = \frac{15}{5496'8} - \frac{15}{5496'8\,(1 \pm 0'05)} = \frac{15(\pm\alpha_a)}{R_{a0}(1 \pm \alpha_a)} = \pm 13\,\mu A$$

$$I_{T\,error\,sensibilitat} = \frac{15}{R_{a0}} + \frac{V_c}{R_{c0}} - \left(\frac{15}{R_{a0}} + \frac{V_c}{R_{c0}(1 \pm \alpha_c)}\right) = \frac{V_c}{R_{c0}} + \frac{V_c}{R_{c0}(1 \pm \alpha_c)} = \frac{V_c(\pm\alpha_c)}{R_{c0}(1 \pm \alpha_c)} =$$

$$= \frac{V_c(\pm 0'05)}{R_{c0}(1 \pm 0'05)} = \pm 0'47\,\mu V_c.$$

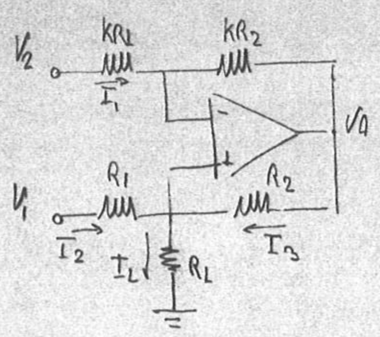
* con tolerancia 0'3% (metalicas de precisión)

$I_{T\,error\,cero} = \pm 1'3\,\mu A$

$I_{T\,error\,sensibi} = 47\,n \cdot V_c$

(1)

a)



$$I_L = I_2 + I_3 \qquad V_L - V_A = I_1 kR_2$$
$$I_L = \frac{V_1 - V_L}{R_1} + \frac{V_A - V_L}{R_2} \qquad V_2 - V_L = I_1 kR_1$$
$$I_L = \frac{V_1 - V_L}{R_1} + \frac{-I_1 \cdot kR_2}{R_2}$$
$$I_L = \frac{V_1 - V_2}{R_1} - \left(\frac{V_2 - V_L}{kR_1}\right)k$$
$$I_L = \frac{V_1 - V_L}{R_1} - \frac{V_2 - V_L}{R_1} = \frac{V_1 - V_L - V_2 + V_L}{R_1} = \frac{V_1 - V_2}{R_1}$$

b)

$V_A = \pm 10V$
$R_1 = 10k$
$R_2 = 2'5k$
$V_2 = 0$

$$V_2 - V_L = I_1 \cdot kR_1$$
$$-V_L = I_1 \cdot k \cdot 10k$$
$$I_1 = \frac{-V_L}{k \cdot 10k}$$

$$V_L - V_A = I_1 \, k \, 2'5k$$
$$V_L = I_1 \cdot k \cdot 2'5k + V_A$$
$$V_L = \frac{-V_L}{k \cdot 10k} \cdot k \cdot 2'5k + V_A$$
$$V_L + 0'25 V_L = V_A$$
$$1'25 V_L = V_A$$
$$V_L = \frac{V_A}{1'25} \quad \begin{cases} V_A = 10 \Rightarrow V_L = 8 \\ V_A = -10 \Rightarrow V_L = -8 \end{cases}$$

FUENTE IDEAL SI: $-8 \le V_L \le 8$

c)

$V_{1\,max} = \pm 10V \qquad I_L = \frac{V_1 - V_2}{R_1}$

$$I_{L\,MAX} = \frac{10}{10k} = 1mA$$
$$I_{L\,min} = \frac{-10}{10k} = -1mA$$

(2)

$$-V_d = V_{BB} + I_B \cdot R_b + A_d \cdot V_d - A_d \cdot V_{io}$$
$$-V_d - A_d V_d = V_{BB} + I_B \cdot R_b$$
$$-V_d \cdot (1 + A_d) = V_{BB} + I_B \cdot R_b$$

$$V_{cc} + V_d = R_a \cdot I_1 \qquad I_1 = \frac{V_{cc} + V_d}{R_a}$$
$$V_c + V_d = R_c \cdot I_2 \qquad I_2 = \frac{V_c + V_d}{R_c}$$

$$I_1 + I_2 = I_B + \beta \cdot I_B \quad (-I_{B10})$$
$$\frac{V_{cc} + V_d}{R_a} + \frac{V_c + V_d}{R_c} = I_B \cdot (1 + \beta) \quad + I_{B10}$$
$$R_c V_{cc} + R_c V_d + R_a V_c + R_a V_d = R_a R_c I_B \cdot (1 + \beta) \quad + R_a R_c I_{B1}$$
$$V_d = \frac{R_a R_c I_B \cdot (1+\beta) - R_c V_{cc} - R_a V_c}{R_a + R_c} \quad + R_a R_c I_{B1}$$

$$-\frac{R_a R_c I_B (1+\beta) - R_c V_{cc} - R_a V_c}{R_a + R_c} \cdot (1 + A_d) = V_{BB} + I_B R_b$$
$$-R_a R_c I_B \cdot (1+\beta) \cdot (1 + A_d) + (R_c V_{cc} + R_a V_c) \cdot (1 + A_d) = (R_a + R_c) V_{BB} + (R_a + R_c) I_B R_b$$
$$-R_a R_c I_B \cdot (1+\beta) \cdot (1 + A_d) - (R_a + R_c) I_B \cdot R_b = (R_a + R_c) V_{BB} - (R_c V_{cc} + R_a V_c) \cdot (1 + A_d)$$
$$I_B = \frac{(R_c V_{cc} + R_a V_c) \cdot (1 + A_d) - (R_a + R_c) \cdot V_{BB} - R_a R_c I_{B1} \cdot (1 + A_d)}{(R_a + R_c) R_b + R_a R_c \cdot (1+\beta) \cdot (1 + A_d)}$$

? $+$ $+A_d \cdot V_{io} \cdot (R_a$

$$I_T = \beta \cdot I_B = \beta \cdot \frac{(R_c V_{cc} + R_a V_c) \cdot (1 + A_d) - (R_a R_c) \cdot V_{BB}}{(R_a + R_c) \cdot R_b + R_a R_c (1+\beta)(1 + A_d)}$$

(3)

$A_d \to \infty$
$\beta \gg 1$

$$I_T = \beta \cdot \frac{R_c V_{cc} + R_a V_c - \frac{(R_a R_c) \cdot V_{BB}}{1 + A_d}}{\frac{(R_a + R_c) \cdot R_b}{1 + A_d} + R_a R_c \cdot (1+\beta)} = \frac{R_c V_{cc} + R_a V_c}{R_a R_c \beta} \beta$$

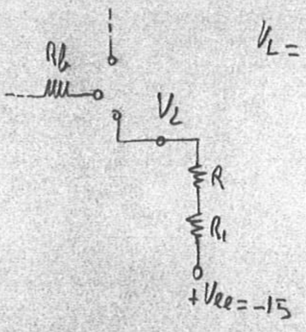
$I_T = 273'17 \mu A \quad V_c = 0$
$I_T = 423'17 \mu A \quad V_c = 15$

$$273'17 \cdot 10^{-6} = \frac{R_c \cdot 15 + R_a \cdot 0}{R_a \cdot R_c}$$
$$R_a = \frac{15}{273'17 \cdot 10^{-6}} = 54910'861 \Omega$$

$$423'17 \cdot 10^{-6} = \frac{R_c \cdot 15 + R_a \cdot 15}{R_a R_c}$$
$$R_c = 100 k\Omega$$

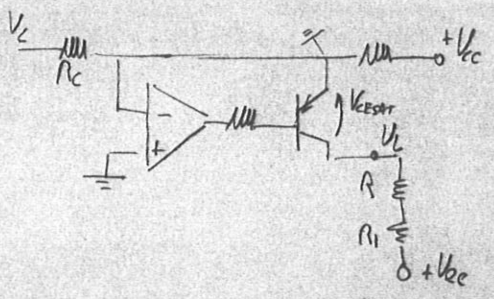
(5) PARA QUE FUNCIONE CORRECTAMENTE LA FUENTE EL TRANSISTOR HA DE ESTAR EN ACTIVA

TRANSISTOR EN CORTE:



$V_L = -15$

TRANSISTOR EN SATURACIÓN



$V_L = V_{CE_{SAT}}$

MARGEN DE TENSIÓN: $-15 < V_L < V_{CE_{SAT}} \simeq 0'2$

(7)

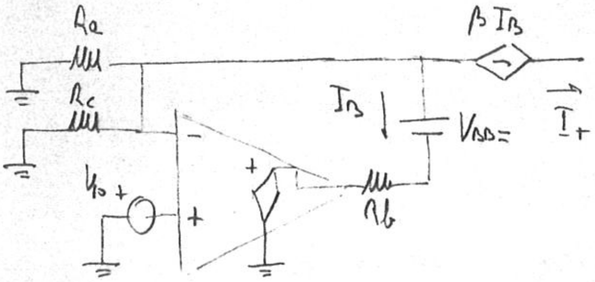
a) LM741:

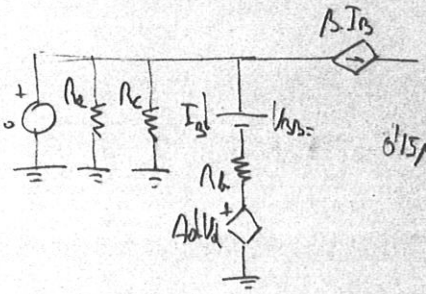
$V_{IO\,TOTAL} = 5m + 15\mu \cdot 20 + 15'84\mu \cdot 2 = 5'33\,mV$

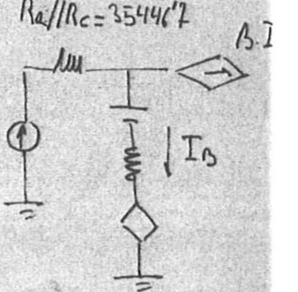
$V_{OS} = 5mV$

$\frac{\Delta V_{OS}}{\Delta T} = 15\mu V/^{\circ}C$

PSRR = 96 dB $\quad \frac{\Delta V_O}{\Delta V} = 15'84\,\mu V/V$







$0'15\mu = I_B + (\beta \cdot I_B)$

$0'15\mu = I_B \cdot (1+\beta)$

$I_B = \frac{0'15\mu}{1+25} = 5'78n$

$I_T = \beta \cdot I_B = 25 \cdot 5'78n = 0'14\mu A$

$T_{ERROR} = 0'14\mu A \; \frac{^{\circ}C}{1\mu A} = 0'14^{\circ}C$

b) OP07

$V_{IO\,TOTAL} = 200\mu V + 1'3\mu \cdot 20 + 20\mu \cdot 2 = 266\mu V$

$V_{OS} = 200\mu V$

$\frac{\Delta V_{OS}}{\Delta T} = 1'3\mu V/^{\circ}C$

PSRR = $20\mu V/V$

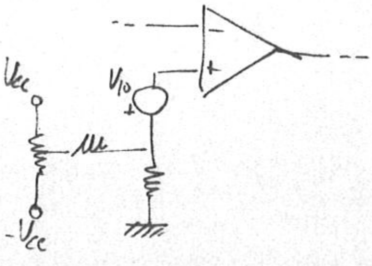
$7'5p = I_B + (\beta \cdot I_B)$

$I_B = 0'288nA$

$I_T = 7'21nA$

$T_{ERROR} = 7'21nA \; \frac{^{\circ}C}{1\mu A} = 0'007^{\circ}C$

COMPENSACIÓN



(8)

a) LM742

$I_{B\,TOTAL} = 500n + 0'5n \cdot 20 = 0'51\mu A$

$I_{B10} = 500nA$

$\frac{I_B}{\Delta T} = 0'5nA/°C$

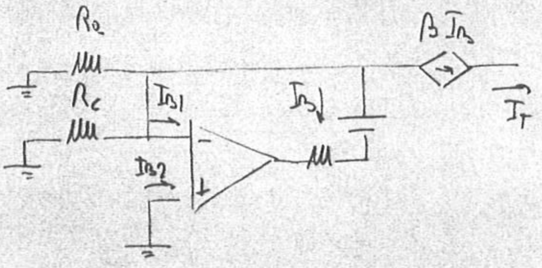
$I_{B\,TOTAL} = \beta I_B + I_B$

$0'51\mu = I_B \cdot (26)$

$I_B = 19'6nA$

$I_T = \beta \cdot I_B = 0'49\mu A$

$T_{ERROR} = 0'49°C$



b) OP07

$I_{B\,TOTAL} = 3n + 50p \cdot 20 = 4pA$

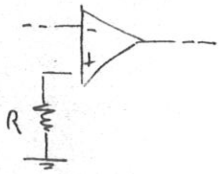
$I_{B10} = 3nA$

$\frac{I_B}{\Delta T} = 50pA/°C$

$I_B = 153'8pA$

$I_T = 3'84pA$ $\quad T_{ERROR} = 3'84m°C$

RED DE COMPENSACION :



(9)

$R_a = R_{a0}(1 \pm \alpha_a)$

$R_c = R_{c0}(1 \pm \alpha_c)$

a) DEL APARTADO 3

$$I_T = \frac{R_c V_{cc} + R_a V_c}{R_a R_c} = \frac{R_c V_{cc}}{R_a R_c} + \frac{R_a V_c}{R_a R_c}$$

$$I_T = \frac{V_{cc}}{R_a} + \frac{V_c}{R_c} = \frac{15}{R_a} + \frac{V_c}{R_c}$$

$$I_{T\,ERROR} = I_{T\,IDEAL} - I_{T\,REAL}$$

CON UNA TOLERANCIA 5%

$R_{a0} = 549108'6\,\Omega$ $\quad R_a = 549108 \cdot (1 \pm 0'05)$

$R_{c0} = 100k\Omega$ $\quad R_c = 100k \cdot (1 \pm 0'05)$

$$I_{T\,ERROR\,CERO} = \frac{15}{R_{a0}} + \frac{V_c}{R_{c0}} - \left(\frac{15}{R_{a0}(1 \pm \alpha_a)} + \frac{V_c}{R_{c0}}\right)$$

$$I_{T\,ERROR\,CERO} = \frac{15}{R_{a0}} - \frac{15}{R_{a0}(1 \pm 0'05)} = \frac{15}{549108} - \frac{15}{549108 \cdot (1 \pm 0'05)} = \frac{15 \cdot (\pm \alpha_a)}{R_{a0}}$$

$$= \pm 1'365\mu A$$

$$I_{T\,ERROR\,SENSIBI} = \frac{15}{R_{a0}} + \frac{V_c}{R_{c0}} - \left(\frac{15}{R_{a0}} + \frac{V_c}{R_{c0} \cdot (1 \pm \alpha_c)}\right) = \frac{V_c}{R_{c0}} - \frac{V_c}{R_{c0} \cdot (1 \pm \alpha_c)} = \frac{\pm}{R}$$

$$= \frac{\pm 0'05}{R_{c0}} \cdot V_c = \pm 500p\, V_c$$

CON TOLERANCIAS 0'5%

$I_{T\,ERROR\,CERO} = \pm 1'36\mu A$

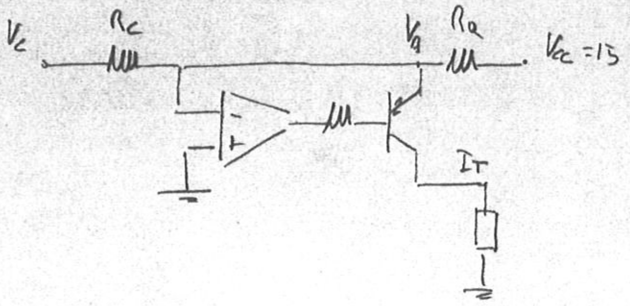
$I_{T\,ERROR\,SENSIBI} = \pm 50pA \cdot V_c$

(P10)

$$I_{\text{ERROR CERO}} = \frac{15 \cdot \left(\pm \delta_a \cdot \Delta T\right)}{R_{a0}} \quad \delta_a \cdot \Delta T \rightarrow 10 \cdot 10^{-6} \cdot 20$$

$$I_{\text{ERROR SENSIBILIDAD}} = \frac{\pm \delta_c \cdot \Delta T}{R_{c0}} \quad \delta_c \cdot \Delta T \rightarrow 500 \cdot 10^{-6} \cdot 20$$

(P6)



$$\frac{V_c}{R_c} + \frac{15}{R_a} = I_T$$

$$\frac{15}{R_a} = 273'15\mu$$

$$R_a = 54914'88$$

$$\frac{15}{R_c} + \frac{15}{54914'88} = 423'15\mu$$

$$R_c = 100k$$